

## Análisis neuronal y redes de transporte

FRANCISCO JAVIER ANTÓN BURGOS  
y JUAN CÓRDOBA Y ORDÓÑEZ

*Universidad Complutense de Madrid*

### 1. Introducción

El análisis neuronal se está mostrando en los últimos tiempos como un destacado sistema de análisis y ejecución de sistemas expertos aplicable a muy diversos campos dentro de las ciencias sociales. Las redes neuronales puestas de manifiesto por Ramón y Cajal son el punto de partida de las aplicaciones denominadas luego como sistemas neuronales artificiales o ANS (Artificial Neural Systems), ensayados desde los setenta, momento en el que se llega a la constancia de que las arquitecturas neumannianas resultan inapropiadas para el cálculo paralelo en tiempo real.

Coincidiendo con la difusión de las integraciones del tipo VLSI –que permiten simular y realizar sistemas con alto potencial de aplicabilidad práctica– en la década de los ochenta Hopfield comienza a combinar los trabajos basados en redes neuronales y la integración VLSI, con los llamados modelos de *vidrios de espin* (Spin-glass) propios de la mecánica estadística, finalizando el proceso preaplicatorio con ensayos de entrenamiento de perceptrones multicapa, solucionándose así las objeciones operativas que se achacaban al perceptrón simple en los ANS (BISHOP, 1994).

La rápida evolución habida en las capacidades operativas de los computadores, en especial de los microprocesadores, ha permitido además de incrementar su potencia, abaratar y versatilizar sus componentes, de modo que su difusión ha traspasado el mero mundo de los ordenadores para llegar a integrarse en los elementos internos de equipos de televisión, vídeo, sonido, electrodomésticos, etc.

Por otro lado, el estudio de las capacidades cerebrales, objeto de emulación con el soporte de los sistemas neuronales artificiales, ha avanzado tanto en los últimos años que los diferentes descubrimientos y avances en neurobiología están permitiendo conocer con mayor precisión su capacidad de aprender a partir de señales del entorno sin necesidad de ser programadas con anterioridad, planteándose entonces la posibilidad de la denominada autoorganización trasvasable a la computación de sistemas, desde la base de la operativa cerebral fundamentada en un complejo sistema de procesamiento no lineal, paralelo, adaptativo y con gran eficiencia energética, mediante un operativo en el que las neuronas se influyen mutuamente a través

de sinapsis excitadoras o inhibitoras, cuyo resultado es una activa y compleja dinámica de activaciones-desactivaciones con principios de autoorganización y adaptación al entorno, emergiendo entonces variadas propiedades de procesamiento. De todo ello se desprendería la capacidad humana de percepción e igualmente la de pensamiento.

Con las redes neuronales artificiales se pretende aprovechar las capacidades cerebrales expresadas mediante el procesamiento autoorganizado de millones de procesadores elementales de base neuronal, junto a las capacidades propias de los computadores en el campo de las funciones de alto nivel, tales como el razonamiento o el cálculo basados en el procesamiento de símbolos. Sin embargo, en las llamadas tareas de bajo nivel, como el reconocimiento de patrones, percepción o control, los computadores muestran aún un torpe desenvolvimiento. Los ANS se conciben entonces como un poderoso instrumento para ejecutar tareas que el cerebro resuelve eficazmente, emulándose su estructura hardware, su sistema de neuronas múltiples interconectadas, y desde su nivel de autoorganización tratar la posibilidad de reproducir dichas capacidades con un soporte informático.

Complemento imprescindible en la práctica de los ANS es la aplicación de las teorías que fundamentan "los sistemas borrosos". La lógica borrosa o *fuzzy logic* está orientada en la dirección de emular el segmento software cerebral, sobre todo en orden a plasmar capacidades de alto nivel en la línea del *razonamiento aproximado*, inscrito en la órbita de lo que se conoce comúnmente como inteligencia artificial. Se trata de traspasar de una lógica imprecisa aquellas cualidades de definición borrosa -típicas del mundo real- a una lógica más allá de la booleana que contemple además su estado y funciones de pertenencia (MARTÍN DEL BRIO-SANZ, 1997). El sistema resultante suele ser sencillo y factible de aplicar mediante microprocesadores, cuya virtualidad será la de ejecutar un tipo de razonamiento aproximado a partir de la información imprecisa que facilita el entorno. Tal tipo de sistemas expertos borrosos pueden ser aplicados en dispositivos de tamaño reducido propios de los electrodomésticos, tanto como en montajes de mayor envergadura física como los *flow counters* o contadores de flujos, de aplicación en tráfico rodado o pilotaje automático de trenes metropolitanos.

De modo que sensu lato las redes neuronales artificiales emularían el hardware del cerebro, mientras que con los sistemas borrosos se emularía el software cerebral. Sus sinergias de análisis y sus automatismos permiten identificar relaciones entrada-salida en el sistema llamadas rasgos característicos a partir de datos empíricos, por causa de su capacidad de aprendizaje a partir de ejemplos dados. Por lo tanto, con los sistemas borrosos se puede emplear el conocimiento disponible procedente de los sistemas expertos para el ulterior desarrollo de sistemas inteligentes.

En la aplicación práctica existen luego ciertas relaciones entre las técnicas neuronales y las estadísticas, normalmente con cotas de error de cálculo mucho más bajas en las primeras que en las de base estadística. Por ejemplo en el modelo neuronal se emplea el *perceptrón simple* (o modo tipo umbral) mientras que en estadística se aplicaría el *análisis discriminante*, la *adalina neuronal* frente a la *regresión lineal*, el *aprendizaje hebbiano no supervisado* frente al *análisis de componentes principales*, la *red simple de Kohonen* frente al *análisis cluster de mínimos cuadrados*, la *cuantificación de vectores* frente al *análisis discriminante* o de *vecindad*, y los *mapas de Kohonen* frente a las *escalas multidimensionales*.

Ahora bien las redes neuronales no resuelven todos los problemas. Constituyen un método muy creativo de resolución de problemas, sin embargo se desconoce de antemano el tipo de ANS más útil en cada caso, por lo que hay que recurrir inicialmente al método de prueba y error (FIESLER, 1994).

Una vez superada esa etapa, una red neuronal bien entrenada, ajustada y verificada aporta un alto grado de fiabilidad en sus resultados y propuestas, configurándose como un recurso imprescindible en aplicaciones y gestión de redes locales de tráfico, sistemas regionales y nacionales de infraestructuras y flujos de tráfico, modelización y toma de decisiones acerca de redes y sistemas de transporte, etc.

## 2. Las redes neuronales y la dinámica de las redes de transporte

En la actualidad los ANS se conforman como una herramienta multidisciplinar empleada desde la física hasta la medicina y desde la biología hasta la lingüística, pasando por la ingeniería del conocimiento. En la investigación geográfica los sistemas neuronales artificiales todavía no son empleados con profusión dentro del corpus metodológico y operativo más convencional, no obstante en el campo de los transportes cuentan con una cierta tradición de ensayo y aplicación en grupos de trabajo radicados en países como Estados Unidos, Israel, Holanda o Italia.

Básicamente se trataría de aprovechar las capacidades que aporta el análisis neuronal junto al modo de computación cuántica que le es propia, beneficiándose entonces de una alta velocidad y de un paralelismo de cálculo, con una resolución muy eficiente por causa del trabajo de todo el sistema al mismo tiempo. Por otro lado, se obtiene una memoria de almacenamiento de enormes dimensiones del orden de  $10^{22}$  símbolos ordinarios, ordenada de forma similar a las cadenas del ADN humano, hecho que permite grandes avances en la aplicación criptográfica de las bases de datos, tal como ha demostrado recientemente el profesor De Garis en Holanda, con la creación de un cerebro artificial integrado por mil millones de neuronas artificiales, almacenadas en tan sólo 1 Gb de memoria.

En el campo de la dinámica de las redes de transporte el análisis neuronal se muestra como un eficaz apoyo en la interpretación de dinámicas subyacentes y también en trabajos de prognosis. La aplicación del análisis neuronal a las redes de transporte está basada en el estudio del comportamiento de las redes neuronales humanas, como agregados de células nerviosas interconectadas. Además, con las redes neuronales se pueden representar correlaciones variables en el tiempo, pudiéndose utilizar como predictores o simuladores de una gran variedad de procesos dinámicos, de ahí su virtualidad (KOHONEN, 1995).

La base de los ANS es la emulación de la estructura hardware del sistema nervioso humano con la intención de construir sistemas de procesamiento que puedan representar un cierto comportamiento "inteligente". Su estructura jerárquica se compone de la neurona o célula de información básica, la capa o agrupación paralela de informaciones del mismo nivel, la red o secuencia de capas dispuestas por prelación jerárquica y el sistema neuronal o conjunto de capas y redes en la misma línea de computación.

Tres son los conceptos clave del proceso de emulación: el paralelismo de cálculo, la memoria distribuida y la resiliencia del sistema o capacidad de adaptabilidad al entorno. El procesamiento paralelo es esencial pues evita dilaciones en el proceso de cálculo, ya que el secuencial es mucho más lento: mientras que en un computador la información ocupa posiciones de memoria bien definidas, en los sistemas neuronales se encuentra distribuida por las sinapsis de la red. El resultado último del proceso descrito es la fácil adaptación de

los ANS al entorno, modificando sus sinapsis que Aaprenden@ de las experiencias pudiendo generalizar conceptos o casos tipo a partir de casos particulares (WARWICK, 1995).

Por ello con las aplicaciones de redes neuronales se pueden representar correlaciones variables en el tiempo, utilizándolas como bases de simulación o incluso de predicción, aplicables a un gran número de sucesos o procesos de carácter dinámico. Las redes neuronales artificiales son capaces de asumir experiencias a partir de señales o datos provenientes de un marco de computación paralela y distribuida de sistemas, hecho que les confiere su gran versatilidad tanto en la capacidad de cálculo como en la provisión de modelos simulados en función de tendencias propias del sistema.

### 3. Aplicaciones en el campo de los transportes

Las líneas de trabajo cultivadas especialmente desde mediados de los años noventa muestran la utilidad práctica del análisis neuronal en el campo de los transportes.

En distintos ámbitos espaciales y aplicados a diferentes temáticas de dicho campo se han llevado a cabo desarrollos que afectan a estudios sobre diseño de redes, modelización de flujos de tráfico, comportamiento de redes, predicción de flujos, y por último, diseño de SIG aplicados a modelos de redes de transporte. Sirvan como ejemplo los casos que a renglón seguido se relatan.

El primer género de aplicaciones se refiere al diseño de redes óptimas de transporte, como las ensayadas por G. POPKEN, del Decision Sciences Department de la Universidad de Dayton (POPKEN, 1996). El ámbito de aplicación estudiado corresponde con el espectro de las redes regionales y suprarregionales de transporte de mercancías y precisa como información necesaria:

- Bases de datos de transporte regional de carga.
- Bases de datos de transporte nacional de carga.

Como herramientas de trabajo utiliza:

- Modelos *hub and spoke*, aporte y dispersión.
- Evaluador de escenarios.
- Aplicaciones matemáticas e informáticas de detalle.

Basando su procedimiento de trabajo en la evaluación de costes según estudios de caso.

El resultado del proceso es la propuesta de una malla de rutas, en la que se seleccionan las que presentan menores costes tanto por el parámetro del peso a transportar como por el de su volumen cúbico, optimizando de ese modo la capacidad de carga de las flotas así como la de las terminales de transferencia y destino, contemplándose además el papel determinante de las distancias en el conjunto de dicho sistemas de parámetros proponiendo líneas preferentes de alta y baja densidad.

El segundo género de aplicaciones está vinculado a la evolución del comportamiento de redes de transporte y la predicción de flujos de tráfico, como las investigadas por el grupo de geógrafos israelíes D. SHMUELLI, I. SALOMON y D. SHEFER de la Universidad de Haifa y la Universidad Hebrea de Israel (SHMUELLI, SALOMON y SHEFER, 1996). El ámbito de aplicación de sus trabajos tiene carácter general, si bien la aplicación directa se ha realizado en el contexto de Israel, teniendo como información necesaria los datos sobre:

- Grupos de edad/sexo,
- Nivel educativo de la población.
- Ratios económicas y de renta.
- Disponibilidad de modos de transporte de la población israelí.

Como herramientas de trabajo emplea:

- Análisis neuronal aplicado a la dinámica de redes.
- Aplicaciones matemáticas e informáticas de detalle.

Siguiendo un procedimiento de trabajo basado en la evaluación del número potencial de viajes per cápita o por unidad familiar.

Su procedimiento de trabajo permite explorar en la problemática del comportamiento de la demanda de transporte, especialmente en un contexto caracterizado por variables casuales individualizadas tanto para hombres como para mujeres, de acuerdo con su edad y demás variables socio-económicas. Se conjuga con ello las ventajas de la simplicidad de agregación de los modelos generales de transporte, con las ventajas teóricas que a nivel de detalle permite la desagregación de elementos de dichos modelos, haciendo un especial hincapié en el modo de tratar el flujo de computación (feed forward) y el entrenamiento de las redes neuronales (backpropagation training).

La estructura del modelo empleado reposa en cinco etapas o pasos, comenzando por el cálculo de los valores de salida desde el bloque de datos en el que se aplica el análisis inicial, determinando luego el grado de error, el peso de los ajustes en el flujo de las unidades de entrada a las unidades de salida, el peso de los ajustes de las unidades de gestión a las hasta que el grado de error es pequeño.

CUADRO 1.  
APLICACIONES DE ANÁLISIS NEURONAL AL CAMPO DE LOS TRANSPORTES

Aplicación	Autor/es	Institución	Ámbito de Aplicación	Información necesaria Herramientas Procedimiento
Diseño de redes óptimas de transporte	G. Popken	Universidad de Dayton	Redes de transporte de mercancías	Bases de datos regionales y suprarregionales de transporte de carga
				Modelos de aporte y dispersión
				Evaluador de escenarios
Evolución del comportamiento de redes de transporte	D. Shmuelli S. Salomon D. Shefer	Universidad de Haifa y hebrea de Israel	Israel	Aplicaciones matemáticas e informáticas
				Evaluación de costes en estudios de caso
				Bases de datos demográficos-renta-modos de transporte
				Análisis neuronal aplicado a dinámica de redes
				Aplicaciones matemáticas e informáticas
				Evaluación del número potencial de viajes per cápita/unidad familiar

Aplicación	Autor/es	Institución	Ámbito de Aplicación	Información necesaria Herramientas Procedimiento
Modelización de tráfico de transporte en flujo interurbano	P. Nijkamp A. Reggiani T. Tritapepe	Universidad libre de Amsterdam y de Bolonia	Italia	Bases estadísticas demográficas Bases de datos de enlaces por carreteras y ferrocarril Comparación de variabilidad de resultados con "logit model" Aplicaciones matemáticas e informáticas Previsión de demanda
Diseño de SIG's para evaluación de modelos de demanda en redes de transporte	H. Miller J. Storm	Universidad de Utah	Estados Unidos	Bases de datos de flujos de transporte Escenario territorial Bases de datos de costes de transporte Sistemas de programación neuronal User interfaces Analizador de resultados Identificación de procesos de Determinismo y estocásticos Establecimiento niveles medios de demanda

Se emplean para las bases de datos inicial características socio-económicas, demográficas y otras relativas a los hábitos de transporte de la población, teniendo en cuenta una contabilidad por hogar o *household record*: número de integrantes de la unidad, familiar, edad, sexo, status de empleo, disponibilidad de licencias de circulación, niveles de renta, horarios o modo de desplazamiento.

Por ello la arquitectura neuronal empleada deriva del interés por confirmar la validez de aplicación de dicha técnica, como ulterior instrumento de predicción tras el análisis explicatorio practicado y la inserción de sucesivos umbrales de ajuste hasta llegar a valores de error considerados como aceptables.

El tercer género de aplicaciones se destina a la modelización de tráfico subyacente de transporte en flujos interurbanos por vía terrestre, como el desarrollado por P. Nijkamp, A. Reggiani y T. Tritapepe, de la Universidad Libre de Amsterdam y de la Universidad de Bolonia (NIJKAMP, REGGIANI y TRITAPEPE, 1996). El ámbito de aplicación se refiere a Italia en particular, si bien puede ser exportado como *modus operandi* a cualquier otro país de análogas características espaciales. La información que se precisa es la siguiente:

- Bases estadísticas demográficas recientes.
- Bases de datos de enlaces por carretera y tren.

Como herramientas de trabajo utilizan:

- El "neural net model" comparativo.
- Comparación de variabilidad de resultados con el "logit model".
- Aplicaciones matemáticas e informáticas de detalle.

El procedimiento de trabajo se fundamenta en la capacidad de previsión de demanda en el ámbito indicado.

La comparación entre el análisis neuronal de redes y el análisis logit posibilita al mismo tiempo evaluar la variabilidad de resultados entre ambos. Los modelos con entrada limitada de datos ermiten el tratamiento de tan sólo un número reducido de parámetros, en tanto que los basados en el análisis neuronal emplean convencionalmente un número mayor de parámetros (Hecho que ya de por sí viene a definir su propia arquitectura) y posibilitan una validación técnica mucho más fiable, junto al tratamiento simultáneo de hasta un elevado número de situaciones. En el ejemplo citado se recurrió al entrenamiento de la red a partir de 698 observaciones, con un proceso de validación que trata 349 observaciones.

Por todo lo expuesto se puede llegar a reducir el tiempo consumido en el cálculo de cada problema y en la validación de los resultados de cada uno de los problemas planteados, obteniéndose unas mayores ventajas en relación con los denominados "modelos discretos" en los que el desarrollo de los componentes de cada problema alcanza una menor profundidad de análisis.

El cuarto género de aplicaciones se refiere a diseños de SIG para la evaluación de modelos medios de demanda en redes de transporte, como los desarrollados por H. MILLER y J. STORM del Geography Department de la Universidad de Utah (MILLER-STORM, 1996). El ámbito de aplicación es general, pero particularizado a Estados Unidos y precisa tres tipos de información:

- Bases de datos de flujos de tráfico
- Escenario prefijado con su correspondiente editor
- Información relativa a los costes del transporte.

En cuanto a las herramientas de trabajo emplea las siguientes:

- Sistemas aplicados de programación neuronal.
- *User interfaces* como el "scenari editor" y el "result analyzer".

Los procedimientos de trabajo atienden a los siguientes aspectos:

- Identificación de procesos, especialmente los vinculados a fenómenos de determinismo y a procesos estocásticos
- Establecimiento de niveles medios de equilibrio en la demanda de transporte.

La potencialidad del análisis neuronal es evidente a todas luces como recurso metodológico y técnico, tanto en el campo de la dinámica de redes en general y como en particular para la geografía de los transportes o de cualquier otra red de servicios.

En la actualidad se encuentran ya disponibles en el mercado internacional distintos paquetes de software basados en el análisis neuronal aplicables a la escala de redes locales, regionales y nacionales, siempre y cuando se cuente con el soporte informático suficiente para albergar las bases de datos necesarias, e incluso determinadas firmas del sector ofrecen ya una pequeña muestra de un software más doméstico basado en la misma técnica pero con precios mucho más asequibles, de indudable valor para la docencia universitaria y los primeros escalones de la investigación de base.

En definitiva, el análisis neuronal aplicado al campo de los transportes se presenta como un potente recurso conceptual y operativo, de alto valor y rentabilidad para el geógrafo preocupado por la evolución de los sistemas dinámicos en cualquier contexto espacio-temporal, que abre además nuevas expectativas y esperanzas a la investigación geográfica de las redes de transporte y sus consiguientes aplicaciones de carácter territorial.

GRÁFICO 1.  
ESTRUCTURA DE LA NEURONA: ENTRADA, SINAPSI, CUERPO CELULAR,  
UMBRAL, AXÓN Y SALIDA

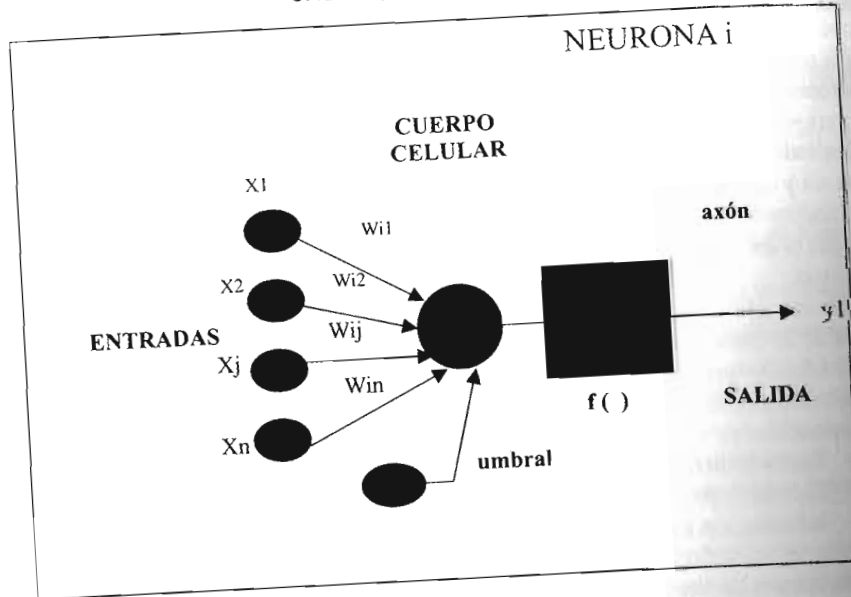
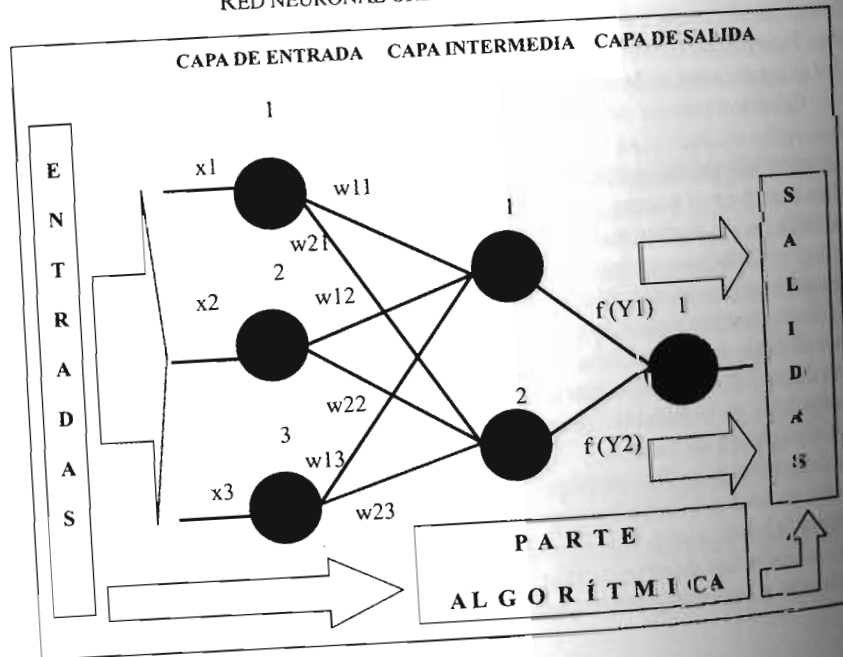


GRÁFICO 2.  
RED NEURONAL ORDENADA POR CAPAS



**Bibliografía**

ARMSTRONG, J. y GRAY, F. (1993): *Structured logic design with VHDL*. Londres, Prentice. Hall, 293 págs.

BAKER, T. y HAMMERSTROM, D. (1989): "Characterization of artificial neural networks algorithms". *International Symposium on Circuits and Systems*, pp. 81-91.

BISHOP, C. M. (1994): "Neural networks and their applications". *Science Instruments*, 65, 6, pp. 1803-1832.

BISHOP, C. M. (1995): *Neural networks for pattern recognition*. Oxford, Oxford University Press, 267 págs.

CABESTANY, J.; CASTILLO, F. y MORENO, M. (1993): "Redes neuronales: realizaciones en CI". *Mundo Electrónico*, 239, pp. 24-31.

CHERBASSKI, V. y LARI-NAFAJI, H. (1991): "Constrained topological mapping for nonparametric regression analysis". *Neural Networks*, 4, pp. 27-40.

COTTRELL, M. y FORT, J. (1987): "Etude d'un algorithme d'auto-organisation". *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, 23, pp. 1-20.

CROAL, I. y MASON, J. (Eds.) (1992): *Industrial applications of neural networks*. Nueva York, Springer-Verlag, 384 págs.

FAVATA, F. y WALKER, R. (1991): "A study of the application of Kohonen-type neural networks to the travelling salesman problem". *Biological Cybernetics*, 64, pp. 463-468

FIESLER, E. (1994): "Neural network classification and formalization". En *Computer standards and interfaces*, J. Fulcher (Ed.), vol. 16., pp. 164-187.

GARCÍA VILALRES, J. et al. (1995): "Short term electric power load-forecasting using artificial neural networks". *14th International Conference on Modelling, Identification and Control*. Ingolstadt, pp. 31-47.

MARDNER, E. (1988): "The space of interactions in neural networks models". *Journal of Physics A*, 21, pp. 257-270.

HAMMERSTROM, D. (1993): "Working with neural networks". *I.E.E.E. Spectrum*, julio 1993, pp. 46-53.

HARTMAN, E.; KEELER, J. y KOWALSKI, J. (1990): "Layered neural networks with gaussian hidden units as universal approximators". *Neural Computation*, 2, 2, pp. 210-215.

HERTZ, J.; KROGH, A. y PALMER, R. (1991): *Introduction to the theory of neural computation*. Londres, Addison. Wesley, 276 págs.

HÖHFELD, H. (1993): "The roles of neural networks and fuzzy logic in process optimization". *Siemens Review*, 1993, pp. 9-13.

HOPFIELD, J. J. (1982): "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities". *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 79, pp. 2554-2558.

HOPFIELD, J. J. y TANK, D. W. (1985): "Neural computation of decisions in organization problems". *Biological Cybernetics*, 52, pp. 141-152.

HOPFIELD, J. J. y TANK, D. W. (1986): "Computing with neural circuits: a model". *Science*, 235, pp. 625-633.

JUJUTEN, C. (1995): "Learning in evolutive neural architectures: an illposed problem?." *Proceedings of International Meeting on Artificial Neural Networks*. Torremolinos, pp. 361-374.

- KOHONEN, T. (1991): "Self-organizing maps: optimization approaches". En *Artificial neural networks*, T. Kohonen y K. Mäkisara.(Eds), Amsterdam, Elsevier, pp. 981-990.
- KOHONEN, T. (1995): *Self-organizing maps*. Nueva York, Springer B Verlag, 326 págs.
- KOSKO, B. (1992): *Neural networks and fuzzy systems*. Londres, Prentice-Hall, 231 págs.
- MARTÍN DEL BRIO, B. y SERRANO CINCA, C. (1993): "Self-organizing neural networks for analysis and representation of data: some financial cases". *Neural Computing and Applications*, 1, pp. 193-206.
- MARTÍN DEL BRIO, B. (1996): "A dot product neuron for hardware implementation of competitive networks". *I.E.E.E. Transactions on Neural Networks*, 7, 2, pp. 529-532.
- MARTÍN DEL BRÍO, B. y SANZ MOLINA, A. (1997): *Redes neuronales y sistemas borrosos*. Madrid, Ra-Ma, 387 págs.
- MILLER, H. y STORM, J. (1996): "Geographic information system design for network equilibrium-bases travel demand models". *Transportation Research C*, vol. 4, n° 6, pp. 373-389.
- NIJKAMP, P.; REGGIANI, A. y TRITAPEPE, T. (1996): "Modelling inter-urban transport flows in Italy: a comparison between neural network analysis and logit analysis". *Transportation Research C*, vol. 4, n° 6, pp. 323-338.
- POPKEN, G. (1996): "An analytical framework for routing multiattribute multicommodity freight". *Transportation Research B*, vol. 30, n° 2, pp.133-145.
- REFENES, A.(Ed.)(1995): *Neural networks in the Capital Markets*. Nueva York, Wiley and Sons, 365 págs
- RITTER, H.; MARTÍNEZ, T. y SCHULTEN, K. (1991): *Neural computation and self-organizing maps*. Nueva York, Addison-Wesley, 268 págs.
- SERRANOCINCA, C y MARTÍN DEL BRÍO, B. (1993): "Predicción de la quiebra bancaria mediante el empleo de redes neuronales artificiales". *Revista Española de Financiación y Contabilidad*, Vol. XXII, 74, pp. 153-176.
- SHMUELLI, D.; SALOMON, I. y SHEFER, D. (1996): "Neural network analysis of travel behavior: evaluating tool for prediction". *Transportation Research C*, vol. 4, n° 3, pp. 151-166.
- WARWICK, K. (1995): "An overview of neural networks in control applications". En *Neural networks for robotic control*, M. Zalzalá (Ed.). Nueva York, Prentice-Hall, pp. 1-25.
- WIDROW, B.; RUMELHART, D. y LEHR, M.(1994): "Neural networks: applications in industry, business and science". *Communications of the A.C.M.*, 37, 3, pp. 93-105.